

# AUTOSTRADA (A14) : BOLOGNA-BARI-TARANTO

TRATTO: BOLOGNA BORGO PANIGALE - BOLOGNA SAN LAZZARO

POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA

"PASSANTE DI BOLOGNA"

## PROGETTO DEFINITIVO

### TANGENZIALI NORD E SUD

CORPO STRADALE da pk 16+117 A14 a pk 17+039 A14


MURO DI CONTRORIPA MC005

RELAZIONE DI CALCOLO

-

<p>IL PROGETTISTA SPECIALISTICO</p> <p>Ing. Marco Pietro D'Angelantonio Ord. Ingg. Milano n.A20155</p> <p>RESPONSABILE GEOTECNICA ALL'APERTO</p>	<p>IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE</p> <p>Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068</p>	<p>IL DIRETTORE TECNICO</p> <p>Ing. Andrea Tanzi Ord. Ingg. Parma N. 1154</p> <p>PROGETTAZIONE NUOVE OPERE AUTOSTRADALI</p>
--	--	---

CODICE IDENTIFICATIVO										ORDINATORE			
RIFERIMENTO PROGETTO			RIFERIMENTO DIRETTORIO				RIFERIMENTO ELABORATO						
Codice Commessa	Lotto, Sub-Prog. Cod. Appalto	Fase	Capitolo	Paragrafo	W B S	Parte d'opera	Tip.	Disciplina	Progressivo	Rev.			
111465	0000	PD	A2	C15	MC005	00000	R	A	P	E	0920	0	SCALA
													-

	<p>PROJECT MANAGER:</p> <p>Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068</p>	<p>SUPPORTO SPECIALISTICO:</p>	<p>REVISIONE</p>		
			n.	data	
				0	SETTEMBRE 2020
				1	
				2	
<p>REDATTO:</p>		<p>VERIFICATO:</p>	3	-	
			4	-	

	<p>VISTO DEL COMMITTENTE</p>  <p>IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Fabio Visintin</p>	<p>VISTO DEL CONCEDENTE</p>  <p><b>Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti</b> DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE E GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI</p>
--	--	--

## Sommar

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
1.1	DESCRIZIONE DELL'OPERA	3
1.2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CRITERI DI VERIFICA	4
1.3	SOFTWARE DI CALCOLO	4
<b>2</b>	<b>MATERIALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO</b>	<b>6</b>
3.1	LIVELLO DELLA FALDA	6
<b>4</b>	<b>INQUADRAMENTO SISMICO</b>	<b>7</b>
4.1	CLASSIFICAZIONE DELL'OPERA E VITA ATTESA	7
4.2	TEMPO DI RITORNO DELL'EVENTO SISMICO	7
4.3	ACCELERAZIONE MASSIMA SU SUOLO ROCCIOSO	8
4.4	PARAMETRI DI RISENTIMENTO IN SUPERFICIE	9
4.4.1	<i>Effetti stratigrafici</i>	9
4.4.2	<i>Effetti topografici</i>	9
4.5	ACCELERAZIONE MASSIMA AL SITO	9
<b>5</b>	<b>ANALISI DELL'OPERA – METODO DI CALCOLO</b>	<b>10</b>
5.1	ANALISI DELLA STRUTTURA	10
5.2	VERIFICHE STRUTTURALI	10
5.3	VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI IMMORSAMENTO DEI PALI	10
5.4	VERIFICA DELLE DEFORMAZIONI IN ESERCIZIO	10
<b>6</b>	<b>ANALISI DEI CARICHI</b>	<b>12</b>
6.1	PESI PROPRI	12
6.2	SPINTA DELLA TERRA IN CONDIZIONI STATICHE	12
6.3	SPINTA DELLA TERRA IN CONDIZIONI SISMICHE	12
6.3.1	<i>Azione sismica</i>	12
6.3.2	<i>Incremento del coefficiente di spinta attiva</i>	14
6.3.3	<i>Riduzione del coefficiente di spinta passiva</i>	14
6.4	AZIONE TRASMESSA DALLE BARRIERE FONASSORBENTI	14
6.5	TRAFFICO VEICOLARE	15
6.6	COMBINAZIONI DI CARICO E COEFFICIENTI PARZIALI	15
<b>7</b>	<b>ANALISI DELL'OPERA - DATI DI INPUT</b>	<b>17</b>
7.1	FASI DI CALCOLO	17
7.2	COEFFICIENTI DI SPINTA DELLA TERRA	18
7.3	OPERA DI SOSTEGNO	19
7.4	AZIONI ESTERNE	19
7.5	AZIONE SISMICA	21
<b>8</b>	<b>ANALISI DELL'OPERA - RISULTATI</b>	<b>22</b>
8.1	SPOSTAMENTI	22
8.2	SOLLECITAZIONI NELLA STRUTTURA	23
<b>9</b>	<b>ANALISI DELL'OPERA - VERIFICHE</b>	<b>25</b>
9.1	VERIFICA DELL'IMMORSAMENTO DEI PALI	25

PROGETTO DEFINITIVO

---

9.2	VERIFICA STRUTTURALE DEI PALI.....	26
9.3	VERIFICA STRUTTURALE DEL CORDOLO TESTA PALI.....	29

## 1 PREMESSA

La presente relazione riporta i calcoli di progetto del muro di controripa MC005, previsto nell’ambito dei lavori di potenziamento in sede del sistema autostradale e tangenziale di Bologna, tra le progressive pk. 16+714 e pk. 16+814 circa della carreggiata NORD. Lo sviluppo lineare del muro, compresi i tratti di raccordo con i cordoli porta-FOA a monte a valle del tratto indicato è di circa 120 m.

### 1.1 DESCRIZIONE DELL’OPERA

La geometria dell’opera, rappresentata in sezione in Figura 1-1, è di seguito descritta:

- Altezza del muro: 2.50 m (compreso cordolo di altezza 1.00 m)
- Tipologia di fondazione: pali trivellati ad elica continua
- Lunghezza pali di fondazione: 10.0 m
- Diametro pali di fondazione: 1.00 m
- Interasse pali di fondazione: 1.20 m
- Dimensione trave di testa dei pali: 1.80 x 1.00 m.

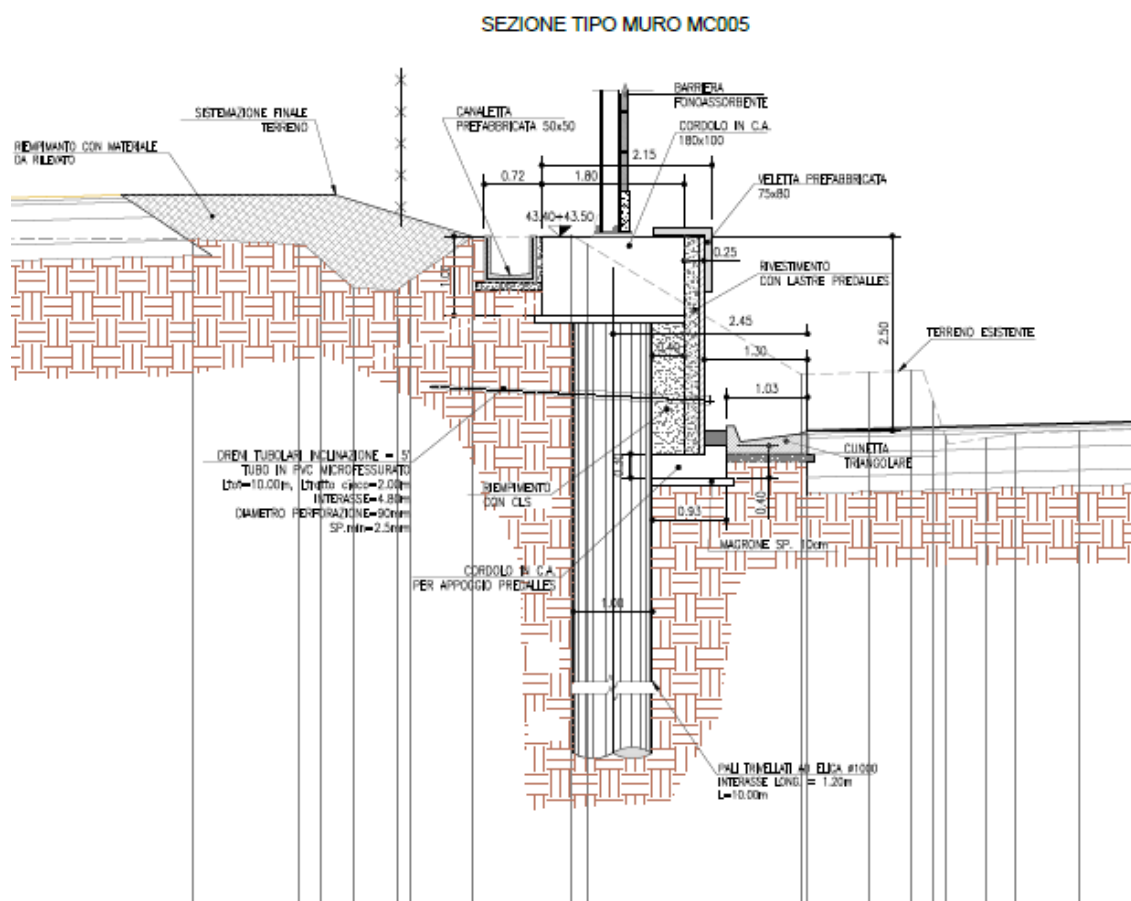


Figura 1-1. Sezione tipo muro di controripa MC005

L’asse di tracciamento dell’opera coincide con l’asse dei pali di fondazione e dista minimo 2.45 m dal ciglio di progetto della carreggiata autostradale in ampliamento.

Alla sommità del muro è prevista l’installazione della barriera antifonica FO41 di altezza pari a 6.50 m.

## 1.2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CRITERI DI VERIFICA

Il progetto è stato svolto con riferimento alla teoria degli Stati Limite, secondo quanto previsto dalla normativa vigente (nel seguito indicata per brevità con la sigla “NTC”):

- D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” - GU n°42 del 20/2/2018, supplemento ordinario n. 8.
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7 C.S.L.L.P.P., "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" - GU n°35 dell'11.02.2019, supplemento ordinario n. 5.

## 1.3 SOFTWARE DI CALCOLO

Per le verifiche geotecniche e strutturali si è fatto ricorso ai seguenti codici di calcolo commerciali:

**PARATIE PLUS 19.1** – *Harpaceas* (verifiche geotecniche)  
**RC-SEC - 2010.4Rev.192** – *Geostru* (verifiche strutturali sezioni in c.a.).

## 2 MATERIALI

### MAGRONE DI SOTTOFONDO

- Classe di resistenza minima: C12/15
- Classe di esposizione: XC0

### CALCESTRUZZO PER PALI DI FONDAZIONE

- Classe di resistenza minima: C25/30
- Classe di esposizione: XC2
- Copriferro “*nominale*” (1): 60mm

### CALCESTRUZZO PER ELEVAZIONE

- Classe di resistenza minima: C32/40
- Classe di esposizione: XF2
- Copriferro “*nominale*” (1): 40mm

### ACCIAIO PER ARMATURA LENTA

- Acciaio in barre: B450C
- Reti: B450A
- Sovrapposizione: 60 diametri

(1) – Copriferro *nominale di calcolo* secondo EN1992-1-1 comprensivo di  $\Delta_{Cdev} = 5\text{mm}$

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

I terreni rinvenuti nel sito di costruzione del muro in oggetto possono essere ascritti alle seguenti due unità geotecniche:

- La formazione A, costituita prevalentemente da argille e limi debolmente sabbiosi a consistenza da soffice a media.
- La formazione B, costituita prevalentemente da ghiaie e ghiaietto in matrice sabbiosa/limosa, addensati.

A tali formazioni sono attribuiti i valori caratteristici dei parametri geotecnici riportati di seguito:

Formazione A (da p.c. locale a 3 m di profondità)

$\gamma$  = peso di volume = 19 kN/mc

$c'$  = coesione efficace = 5 kPa

$\phi'$  = angolo di attrito = 26°

$E'$  = modulo elastico operativo = 5 MPa

$E_{ur}$  = modulo elastico operativo in scarico-ricarico = 10 MPa

Formazione A (a profondità >3 m dal p.c. locale)

$\gamma$  = peso di volume = 19 kN/mc

$c'$  = coesione efficace = 0 kPa

$\phi'$  = angolo di attrito = 28°

$E'$  = modulo elastico operativo = 10 MPa

$E_{ur}$  = modulo elastico operativo in scarico-ricarico = 20 MPa

Formazione B

$\gamma$  = peso di volume = 20 kN/mc

$c'$  = coesione efficace = 0 kPa

$\phi'$  = angolo di attrito = 38°

$E'$  = modulo elastico operativo = 30 MPa

$E_{ur}$  = modulo elastico operativo in scarico-ricarico = 45 MPa

Per quanto concerne i rilevati stradali esistente e/o di nuova realizzazione, si considerano, cautelativamente, i seguenti parametri geotecnici:

$\gamma$  = peso di volume = 19 kN/mc

$c'$  = coesione efficace = 0 kPa

$\phi'$  = angolo di attrito = 35°

$E'$  = modulo elastico operativo = 35 MPa

La stratigrafia di riferimento per il progetto del muro, desunta dagli specifici documenti di progetto (si veda in particolare il sondaggio PB23, Servizi Geotecnici, 2017), è la seguente:

Da p.c. locale a profondità > 25 m:

Formazione **A**.

#### 3.1 LIVELLO DELLA FALDA

Il livello piezometrico di progetto è assunto cautelativamente a 2 m dal p.c. locale di valle.

## 4 INQUADRAMENTO SISMICO

### 4.1 CLASSIFICAZIONE DELL'OPERA E VITA ATTESA

In accordo con quanto previsto dalle NTC, la vita nominale minima dell'opera in progetto può essere definita con riferimento alla tabella n.4.1.

In relazione alle conseguenze di una interruzione di funzionalità o del collasso in caso di sisma, invece, l'opera in esame viene classificata secondo quanto riportato in tabella n.4.2.

Opera	Tipo	V <sub>N</sub>
Parti d'opera provvisoriale con V <sub>N</sub> ≤ 2anni	1	≤ 2
Parti d'opera provvisoriale con 2anni < V <sub>N</sub> ≤ 10anni	1	≤ 10
Opere ordinarie	2	≥ 50
Grandi opere	3	≥ 100

*Tabella n.4.1 – Tipo e vita nominale dell'opera (NTC – tabella 2.4.I)*

Classe d'uso	I	II	III	IV
Uso previsto	Presenza occasionale di persone	Normale affollamento	Affollamento significativo	Funzione pubblica/strategica
C <sub>U</sub>	0.7	1.0	1.5	2.0

*Tabella n.4.2 – Classi e coefficienti d'uso (NTC – tabella 2.4.II)*

Nel caso specifico in studio si assume quanto segue:

V<sub>N</sub> = 50 anni  
 Classe d'uso IV  
 C<sub>U</sub> = 2.0

Pertanto, il periodo di riferimento (V<sub>R</sub>) rispetto al quale valutare le azioni sismiche, definito come prodotto tra la vita nominale V<sub>N</sub> ed il coefficiente d'uso C<sub>U</sub> (cfr. paragrafo n.2.4.3 – NTC), risulta pari a:

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \text{ anni} \times 2 = 100 \text{ anni.}$$

### 4.2 TEMPO DI RITORNO DELL'EVENTO SISMICO

Fissato il periodo di riferimento V<sub>R</sub> e stabilita la probabilità di superamento nel periodo di riferimento P<sub>VR</sub> (funzione dello stato limite considerato come indicato in tabella n.4.3), è possibile stimare il periodo di ritorno dell'azione sismica T<sub>R</sub> attraverso l'espressione:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Nel caso specifico in studio si fa riferimento allo stato limite SLV, cui corrisponde il seguente valore del tempo di ritorno dell'evento sismico:

$$T_R = 949 \text{ anni.}$$



Stati limite di esercizio ( $P_{VR}$ )	Stati limite ultimi ( $P_{VR}$ )
SLO - Stato limite di operatività (81%)	SLV- Stato limite di salvaguardia (10%)
SLD - Stato limite di danno (63%)	SLD – Stato limite di prevenzione del collasso (5%)

*Tabella n.4.3 – Stati limite secondo le NTC e relative probabilità di superamento  $P_{VR}$*

### 4.3 ACCELERAZIONE MASSIMA SU SUOLO ROCCIOSO

Il valore di accelerazione orizzontale massima attesa nel sito di interesse (e degli altri parametri necessari alla determinazione delle azioni sismiche) può essere determinato a partire dai valori pubblicati dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) con riferimento a diversi punti ubicati sul territorio nazionale secondo una griglia di 10 km x 10 km. Detti valori sono riportati nell'allegato B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 (S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29), cui le norme tecniche vigenti dispongono di riferirsi (cfr. § 3.2 delle NTC 2018).

Più esattamente, il valore al sito viene definito mediando i valori di accelerazione caratteristica dei 4 nodi più prossimi al sito stesso, in funzione della distanza, come di seguito indicato:

$$a_g = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{a_{g,i}}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

Nella precedente espressione,  $a_g$  è l'accelerazione massima al sito, su suolo tipo A,  $a_{g,i}$  è l'accelerazione massima su suolo tipo A nell' $i$ -esimo punto del reticolo e  $d_i$  è la distanza del sito di interesse dall' $i$ -esimo punto medesimo.

Analogo procedimento può essere adottato per gli altri parametri sismici di interesse:  $F_0$  e  $T^*c$ , rispettivamente valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale e valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Qualora i dati relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento non contemplino il periodo di ritorno corrispondente al periodo di riferimento  $V_R$  e alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  dell'evento sismico in detto periodo fissate in progetto, il valore del generico parametro  $p$  ( $a_g, F_0, T^*c$ ) ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione, a partire dai dati relativi ai periodi di ritorno  $T_R$  disponibili, utilizzando l'espressione seguente, nella quale  $p$  è il valore del parametro di interesse corrispondente al periodo di ritorno  $T_R$  desiderato e  $T_{R1}$  e  $T_{R2}$  sono i periodi di ritorno più prossimi a  $T_R$  per i quali si dispone dei valori  $p_1$  e  $p_2$  del generico parametro  $p$ :

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1}$$

Le coordinate geografiche (WGS84) di riferimento per il muro in progetto sono:

Latitudine: 44,511711  
Longitudine: 11,379933

In tabella n.4.4 sono riportati il numero identificativo dei nodi del reticolo INGV più vicini, le relative coordinate geografiche e la rispettiva distanza dal sito in esame.

Ne derivano i parametri sismici ( $a_g, F_0$  e  $T^*c$ ) di cui alla tabella n.4.5 relativi allo stato limite di salvaguardia della vita considerato ed al relativo tempo di ritorno.

PUNTO	ID	LAT	LONG	DISTANZA (m)
1	16730	44,5150	11,3175	5038,990
2	16731	44,5163	11,3875	659,875
3	16953	44,4663	11,3893	5199,724
4	16952	44,4650	11,3193	7209,475

*Tabella n.4.4 – Reticolo di riferimento – Coordinate*

STATI LIMITE	<b>V<sub>R</sub> = 100 anni (C.U. IV, V<sub>N</sub> = 50 anni)</b>			
	<b>T<sub>R</sub> (anni)</b>	<b>a<sub>g</sub> (g)</b>	<b>F<sub>o</sub> (-)</b>	<b>T<sub>c</sub>* (-)</b>
SLV	949	<b>0.212</b>	2.439	0.312

*Tabella n.4.5 – Parametri sismici al sito – suolo tipo A affiorante*

#### **4.4 PARAMETRI DI RISENTIMENTO IN SUPERFICIE**

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia ed alla conformazione topografica vengono messi in conto mediante due specifici parametri: S<sub>s</sub>, per gli effetti stratigrafici e S<sub>T</sub>, per gli effetti topografici.

##### **4.4.1 Effetti stratigrafici**

Il parametro S<sub>s</sub> che tiene conto degli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia, viene calcolato in funzione della categoria di sottosuolo e della sismicità locale.

Nel caso in esame, tenuto conto di quanto riportato nella Relazione Geotecnica, si assume:

Categoria di suolo tipo **C**.

Di qui, in funzione dei valori dei parametri riportati in tabella n.4.5, dalle espressioni di S<sub>s</sub> riportate in tabella 3.2.IV delle NTC, si ottiene:

$$S_s (\text{SLV}) = 1.7 - 0.6 * F_o * a_g/g \cong 1.39.$$

##### **4.4.2 Effetti topografici**

Nel caso specifico in studio il terreno risulta pressoché pianeggiante. Pertanto, si assume:

Categoria pendio **T1**.

Di qui, facendo riferimento alla tabella n.3.2.III delle NTC, si ricava:

$$S_T = 1.0.$$

#### **4.5 ACCELERAZIONE MASSIMA AL SITO**

L'accelerazione orizzontale massima al sito (a<sub>max</sub>) è calcolata come prodotto dell'accelerazione massima attesa su affioramento rigido (a<sub>g</sub>) e dei fattori di amplificazione stratigrafica e topografica (S<sub>s</sub> ed S<sub>T</sub>).

Si ottiene pertanto:

$$a_{\text{max}} (\text{SLV}) = a_g \times S_T \times S_s = 0.295 \text{ g.}$$

## 5 ANALISI DELL'OPERA – METODO DI CALCOLO

L'opera di sostegno in progetto è stata modellata come “*opera flessibile*”.

L'analisi dell'interazione terreno-struttura è stata svolta con l'ausilio del codice di calcolo non lineare ad Elementi Finiti “PARATIE PLUS 19.1” commercializzato da Harpaceas.

Si è fatto riferimento alle seguenti ipotesi:

- Stato piano di deformazione (opera di lunghezza infinita).
- Terreno modellato come letto di molle indipendenti, caratterizzate da un legame costitutivo elastico-perfettamente plastico, con criterio di rottura di Mohr-Coulomb.
- Struttura discretizzata in elementi perfettamente elastici.
- Eventuali contrasti modellati per mezzo di molle di opportuna rigidità.
- Sovraccarichi a monte ed a valle della paratia trasformati in spinte sul paramento in accordo a quanto previsto dalla teoria elastica.
- Mobilitazione della spinta della terra funzione del livello di deformazione partendo da una condizione iniziale di spinta “*a riposo*” ( $k_0$ ).
- Valori massimo e minimo della spinta definiti rispettivamente in funzione dei coefficienti di spinta “*passiva*” ( $K_p$ ) e “*attiva*” ( $K_a$ ) dei terreni.

La rigidità  $k$  delle molle è data dal rapporto  $k = E / L$ , dove  $E$  è il modulo di rigidità del terreno mentre  $L$  è una grandezza geometrica caratteristica diversa a valle e a monte della paratia perché diversa è la zona di terreno coinvolta dal movimento della struttura in zona attiva e passiva. Il parametro  $E$  tiene conto degli effetti dello scarico/ricarico mediante opportuni coefficienti moltiplicativi. Per ogni dettaglio si rimanda al Manuale teorico del programma.

### 5.1 ANALISI DELLA STRUTTURA

In accordo al §6.5.3.1.2 delle NTC, le verifiche dell'opera di sostegno in esame sono state svolte considerando l'Approccio 1 che prevede le combinazioni di coefficienti parziali ( $A1+M1+R1-R3$  per i tiranti) e ( $A2+M2+R1$ ). L'uso dell'Approccio 1 impone (cfr. §2.6.1 NTC) che “[...] *in tutti i casi, sia nei confronti del dimensionamento strutturale, sia per quello geotecnico, si deve utilizzare la combinazione più gravosa fra le due precedenti [...]*”. Nella fase di realizzazione dell'opera si è considerato un sovra-scavo pari al massimo 50cm come previsto al §6.5.2.2 delle NTC.

### 5.2 VERIFICHE STRUTTURALI

Le verifiche strutturali dei pali di fondazione e del muro in elevazione sono svolte con riferimento alla teoria dello stato limite, considerando le caratteristiche di resistenza dei materiali relative alle classi definite nel precedente Capitolo 2 e negli elaborati grafici di progetto.

Si è inoltre imposto, anche in caso di sisma, un comportamento *non dissipativo*, si è imposto cioè che le strutture in c.a. permanessero in campo elastico.

### 5.3 VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI IMMORSAMENTO DEI PALI

La lunghezza di immersione dei pali di fondazione viene definita sulla base del più restrittivo dei seguenti criteri:

- Garanzia nei riguardi della stabilità globale dell'opera.
- Immersione minima di 5.0 m al di sotto della quota di fondo scavo.
- Mobilitazione della spinta passiva non superiore al 90% della spinta potenzialmente disponibile nelle condizioni più gravose.

### 5.4 VERIFICA DELLE DEFORMAZIONI IN ESERCIZIO

In condizioni SLE si verifica che siano rispettate le seguenti limitazioni sugli spostamenti calcolati:

PROGETTO DEFINITIVO

---

- Spostamento massimo complessivo da inizio costruzione ( $s_{max}$ ) inferiore all' 1.5% dell'altezza fuori terra del muro:

$$s_{max} \leq 1.5\% H_{muro}.$$

- Spostamento in esercizio al netto dello spostamento a fine costruzione ( $\Delta s$ ) inferiore allo 0.5% dell'altezza fuori terra del muro:

$$\Delta s \leq 0.5\% H_{muro}.$$

## 6 ANALISI DEI CARICHI

### 6.1 PESI PROPRI

Per il calcestruzzo gettato in opera si è considerato un peso proprio pari a 25 kN/m<sup>3</sup>.

### 6.2 SPINTA DELLA TERRA IN CONDIZIONI STATICHE

Il coefficiente di spinta a riposo, che rappresenta il rapporto tra le tensioni efficaci orizzontale e verticale in sito prima delle operazioni di scavo, è calcolato in accordo alla seguente espressione:

$$K_0 = K_0^{NC} \times (\text{OCR})^m$$

Con:

$K_0^{NC} = 1 - \sin(\phi')$ , coefficiente di spinta a riposo in condizioni di normal-consolidazione;

$\phi'$  = angolo di resistenza al taglio del terreno;

OCR = grado di sovraconsolidazione;

m = coefficiente empirico compreso tra 0.4 e 0.7 (Ladd et al, 1977e Jamiolkowski et al, 1979).

Il coefficiente di spinta attiva ( $K_a$ ) e di spinta passiva ( $K_p$ ) sono invece valutati ricorrendo alle correlazioni di Caquot & Kerisel (1948), valide per superfici di rottura di tipo complesso (spirale logaritmica) ed in grado di tenere conto dell'attrito tra paratia e terreno ( $\delta$ ). Con riferimento a quest'ultimo parametro, nel caso in studio si è assunto  $\delta/\phi = 0.67$ .

### 6.3 SPINTA DELLA TERRA IN CONDIZIONI SISMICHE

#### 6.3.1 Azione sismica

L'azione sismica viene tenuta in conto nella valutazione della spinta del terreno secondo un approccio pseudo-statico, considerando 2 differenti effetti:

- L'incremento del coefficiente di spinta attiva del terreno.
- Il decremento del coefficiente di spinta passiva del terreno.

Ciò si ottiene introducendo nel calcolo dei coefficienti di spinta attiva e passiva l'angolo  $\theta$ , valutato secondo quanto rappresentato nel seguente prospetto:

<b>Caso 1:</b> Assenza di falda	$\vartheta = \arctan k_h / (1 \pm k_v)$	$\gamma^* = \gamma_{nat} \cong \gamma_{sat}$
<b>Caso 2:</b> Terreno saturo impermeabile	$\vartheta = \arctan \left( \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \right) \cdot k_h / (1 \pm k_v)$	$\gamma^* = \gamma'$
<b>Caso 3:</b> Terreno saturo permeabile	$\vartheta = \arctan \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \right) \cdot k_h / (1 \pm k_v)$	$\gamma^* = \gamma'$

I coefficienti sismici orizzontale e verticale  $k_h$  e  $k_v$ , che compaiono nell'espressione di  $\theta$ , sono definiti al paragrafo n.7.11.6.3.1 delle NTC:

- $k_h = a_h/g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max} \geq 0.2 \cdot a_{max}$
- $k_v = a_v/g = 0$

dove:

- $a_h$  e  $a_v$  sono le componenti orizzontale e verticale dell'accelerazione statica equivalente all'accelerazione sismica;
- $a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$  è l'accelerazione massima di progetto, definita nel precedente Capitolo 4;
- $\alpha \leq 1$  è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera, funzione dell'altezza complessiva H della paratia e della categoria sismica di sottosuolo (cfr. figura n.6.1);
- $\beta \leq 1$  è un coefficiente che dipende dalla capacità dell'opera di subire deformazioni senza conseguenti cadute di resistenza, funzione del massimo spostamento  $u_s$  tollerabile in tal senso dalla struttura (cfr. figura n.6.2).

Le NTC impongono che lo spostamento massimo tollerato dalla paratia senza riduzione della resistenza non possa essere in ogni caso considerato maggiore dello 0.5 % dell'altezza complessiva della paratia:  $u_s \leq 0.005 \times H$ .

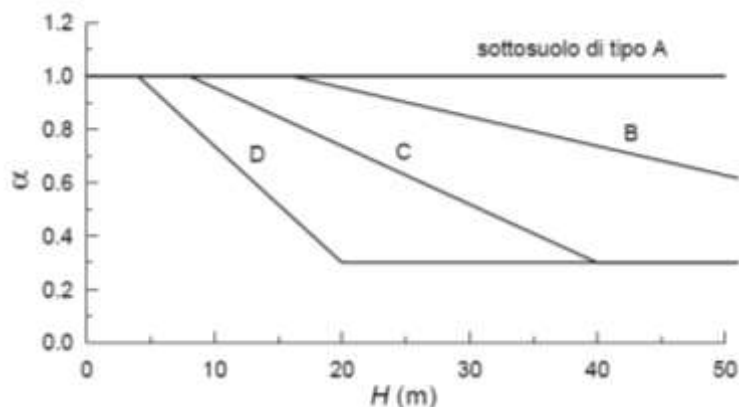


Figura 6.1 – Coefficiente  $\alpha$  (figura n.7.11.2 – NTC)

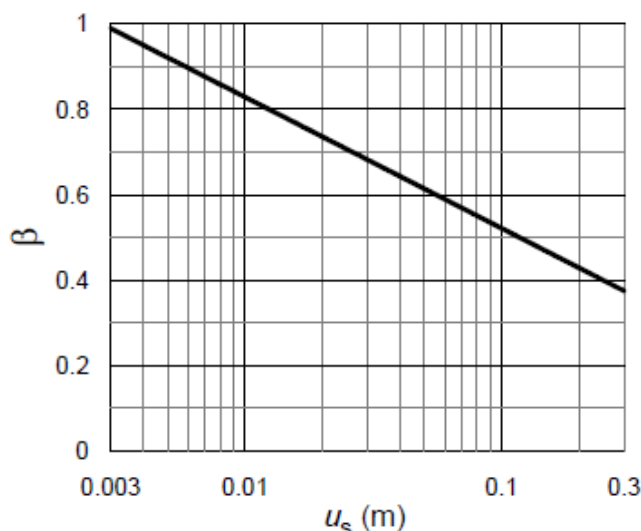


Figura 6.2 – Coefficiente  $\beta$  (figura n.7.11.3 – NTC)

Nel caso in esame (suolo di categoria sismica C, altezza totale della paratia  $H = 11.0 \text{ m} \rightarrow u_{s,max} = 0.005 \times H = 0.055 \text{ m}$ ), si ottiene:

$$\alpha \approx 1.0;$$

$$\beta \approx 0.60.$$

Per quanto riguarda il comportamento idraulico del terreno, si è fatto riferimento al caso 2: terreno impermeabile saturo.

Definito l'angolo  $\theta$ , la spinta in condizioni sismiche è stata valutata avvalendosi del metodo di Mononobe-Okabe, che estende al caso di presenza di azioni statiche equivalenti al sisma la soluzione di Coulomb, basata come noto sull'ipotesi di superficie di scorrimento piana.

Rimandando per ogni dettaglio all'ampia Letteratura Scientifica sull'argomento, qui si ricorda brevemente che l'attrito opera-terreno determina la non planarità delle superfici di scorrimento e che l'assunzione di una superficie piana comporta un errore a sfavore di sicurezza nella stima delle azioni sulla parete; questo errore è modesto nelle condizioni limite attive, ma può risultare inaccettabilmente elevato nelle condizioni limite passive, specie per valori di  $\delta/\phi > 0.5$ . Per tale motivo, nella valutazione del coefficiente di spinta passiva in condizioni sismiche, a meno di non voler utilizzare metodi che tengano conto della non planarità delle superfici di scorrimento, è preferibile porre  $\delta = 0$ .

### 6.3.2 Incremento del coefficiente di spinta attiva

Il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche (contributo statico + contributo sismico) viene calcolato ricorrendo alla seguente formula di Mononobe & Okabe:

$$K_{as} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi - \vartheta)}{\cos \vartheta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \vartheta - \delta) \left[ 1 + \frac{\sqrt{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \vartheta)}}{\sqrt{\sin(\psi - \vartheta - \delta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Definito il coefficiente di spinta attiva ( $K_{as}$ ) si valuta la spinta attiva totale in presenza di sisma e, per differenza rispetto alla spinta attiva in condizioni statiche, si ottiene l'incremento di spinta dovuto al solo sisma:

$$\Delta S_{as} = S_{as} - S_a$$

La forza così calcolata viene distribuita sull'intera altezza dell'opera di sostegno attraverso un diagramma di pressione trapezia caratterizzato dai seguenti valori alla testa e alla base della paratia:

$$\Delta P_{testa} = (\Delta S_{as} / H) \times 1.6,$$

$$\Delta P_{base} = (\Delta S_{as} / H) \times 0.4.$$

### 6.3.3 Riduzione del coefficiente di spinta passiva

In analogia a quanto visto per la spinta attiva, sempre attraverso il metodo di Mononobe & Okabe, è possibile calcolare il coefficiente di spinta passiva in presenza di sisma, attraverso la seguente espressione:

$$K_{ps} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi - \vartheta)}{\cos \vartheta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \vartheta) \left[ 1 - \frac{\sqrt{\sin(\varphi) \sin(\varphi - \beta - \vartheta)}}{\sqrt{\sin(\psi - \vartheta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Si noti che nell'espressione di  $K_{ps}$  non compare l'angolo  $\delta$  di attrito parete-terreno, che per i motivi ricordati al precedente paragrafo 6.3.2 è stato posto uguale a zero.

## 6.4 AZIONE TRASMESSA DALLE BARRIERE FONOASSORBENTI

La valutazione della pressione del vento sulle barriere fonoassorbenti e delle azioni al piede dei montanti da essa derivanti sono oggetto di elaborati di progetto specifici ai quali si rimanda per ogni dettaglio.

Ai fini del progetto e delle verifiche delle opere di sostegno sulle quali le barriere insistono, cautelativamente, si considera il valore massimo della pressione, cioè quello che agisce sui pannelli “di bordo”; inoltre, a favore di sicurezza, si trascura l'effetto “stabilizzante” del peso dei montanti e dei pannelli sulle paratie.

I valori caratteristici delle sollecitazioni agenti al piede dei montanti di bordo della barriera fonoassorbente installata sul muro in oggetto (altezza pari a 6.50m, interasse tra i montanti uguale a 4m) sono riassunti in tabella n.6.1.

Per il dimensionamento dell'opera di sostegno in oggetto è significativa la combinazione “3 VENTO X +” (vento diretto dall'esterno della carreggiata verso la sede autostradale).

Le azioni agenti per metro lineare di paratia si ottengono dividendo i valori riportati in tabella n. 6.1 per l'interasse tra i montanti, che è pari come si è detto a 4 m (tabella n. 6-2).

	Peso risultante	Azione normale	Taglio	Momento
	$F_k$	$N_k$	$T_k$	$M_k$
	(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)
<b>1 Peso proprio</b>	6.5	-6.5	0.0	-0.5
G1a - inferiore	4.0	-4.0	0.0	0.0
G1b - superiore	2.5	-2.5	0.0	-0.5
<b>2 Carichi permanenti</b>	19.5	-19.5	0.0	-5.7
G2 - pannello inferiore in cls	7.5	-7.5	0.0	-1.8
G3 - pannelli inferiori in acciaio	7.0	-7.0	0.0	-1.6
G4 - pannelli superiori in acciaio	5.0	-5.0	0.0	-2.3
<b>G - Pesì propri e permanenti</b>	<b>26.0</b>			
	<b>Forza risultante</b>	<b>Azione normale</b>	<b>Taglio</b>	<b>Momento</b>
	$F_k$	$N_k$	$T_k$	$M_k$
	(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)
<b>3 Vento X+</b>		-3.6	53.9	-181.4
pannelli inferiori	33.4	0.0	33.4	-70.1
pannelli superiori	20.8	-3.6	20.5	-111.4
<b>4 Vento X-</b>		3.3	-49.6	167.1
pannelli inferiori	-30.7	0.0	-30.7	64.5
pannelli superiori	-19.2	3.3	-18.9	102.6
<b>6 Pressione dinamica veicolare</b>		1.4	-20.7	69.6
pannelli inferiori	-12.8	0.0	-12.8	26.9
pannelli superiori	-8.0	1.4	-7.9	42.7

. Tabella n.6.1 – Azioni sui montanti di bordo per FOA di altezza  $h = 6.5$  m

	Azione normale	Taglio	Momento
	$N_k$	$T_k$	$M_k$
	(kN/m)	(kN/m)	(kNm/m)
<b>1 Peso proprio + permanenti</b>	-6.5	0.0	-1.6
<b>3 Vento X+</b>	-0.9	13.5	-45.4
<b>4 Vento X-</b>	0.8	-12.4	41.8

Tabella n.6.2 – Azioni del vento per metro lineare di muro

## 6.5 TRAFFICO VEICOLARE

Si tiene conto del carico dovuto al traffico veicolare a tergo dell'opera di sostegno mediante una pressione uniforme di valore caratteristico  $q = 20$  kPa.

## 6.6 COMBINAZIONI DI CARICO E COEFFICIENTI PARZIALI

Per il muro in progetto, l'analisi è stata svolta con riferimento alle seguenti condizioni di carico:

- Vento dominante rispetto al traffico,
- Traffico dominante rispetto al vento,



- Sisma.

Di default il codice di calcolo utilizzato esegue una analisi denominata *nominal* in cui tutti i coefficienti parziali sono posti pari ad 1; in tabella n.6.3, invece, sono riassunti i valori dei coefficienti parziali sulle azioni e dei coefficienti di combinazione adottati nelle ulteriori combinazioni di carico analizzate ai sensi delle NTC.

C.d.C.		Coefficienti di combinazione, $\psi_{i,j}$				Coefficienti parziali
ID	NOME	Traffico	Vento	Sisma	Urto	$\gamma_F$
<b>SLE - RARA</b>	Traffico	1.00	0.6	0	0	1.0
	Vento	0.75	1.0	0	0	1.0
<b>SLU (A1+M1+R1)</b>	Traffico	1.00	0.6	0	0	1.5
	Vento	0.75	1.0	0	0	1.5
<b>SLU (A2+M2+R1)</b>	Traffico	1.00	0.6	0	0	1.3
	Vento	0.75	1.0	0	0	1.3
<b>SLV</b>	Sisma	0.25	0.0	1	0	1.0

*Tabella n.6.3 – Coefficienti parziali e di combinazione*

Per brevità, nel seguito, le combinazioni SLE-RARA, SLU - (A1+M1+R1) e SLU - (A2+M2+R2), saranno denominate rispettivamente SLE, SLU-STR e SLU-GEO.

## 7 ANALISI DELL'OPERA - DATI DI INPUT

### 7.1 FASI DI CALCOLO

L'analisi dell'interazione opera-terreno è stata sviluppata attraverso le seguenti fasi:

1. Simulazione della configurazione del terreno precedente alla costruzione del muro.
2. Realizzazione dell'opera di sostegno e riprofilatura del terreno a valle.
3. Risagomatura del rilevato a monte dell'autostrada.
4. Applicazione del carico dovuto al traffico veicolare (condizione di traffico dominante).
5. Applicazione delle azioni dovute al vento (condizione di vento dominante).
6. Applicazione della sovra-spinta sismica.

Una rappresentazione grafica delle fasi sopra elencate è riportata in Figura 7-1.



Figura 7-1. Fasi di calcolo

## 7.2 COEFFICIENTI DI SPINTA DELLA TERRA

Nelle figure 7.2, 7.3 e 7.4, con ovvio significato dei simboli, sono riportati i valori dei coefficienti di spinta rispettivamente nelle combinazioni SLE e SLU-STR, nella combinazione SLU-GEO e nella combinazione SLV.

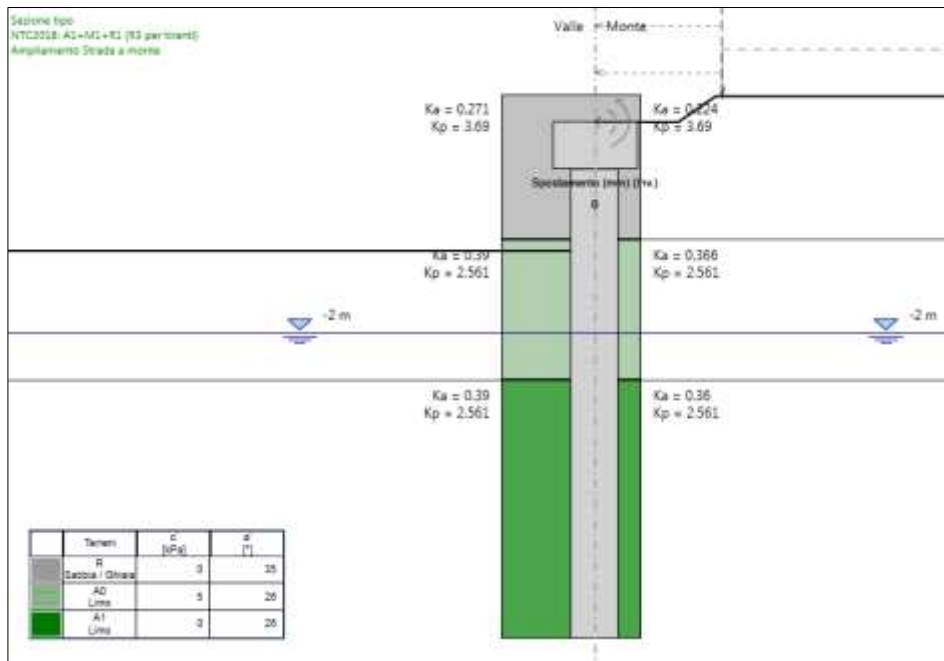


Figura 7-2. Coefficienti di spinta nelle combinazioni SLE e SLU-STR

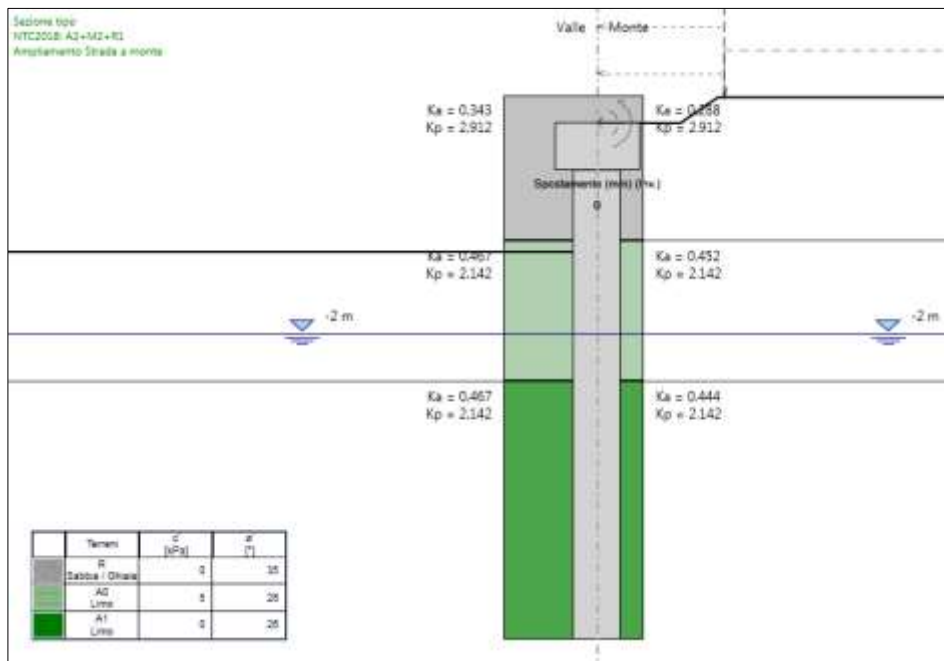


Figura 7-3 Coefficienti di spinta nella combinazione SLU-GEO

**PROGETTO DEFINITIVO**

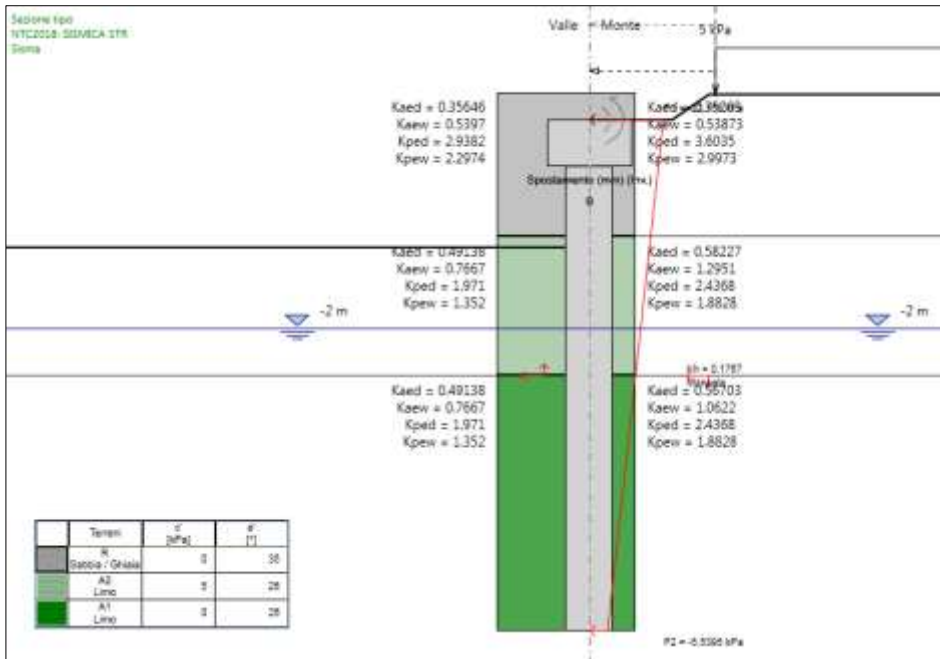


Figura 7-4 Coefficienti di spinta nella combinazione SLV

### 7.3 OPERA DI SOSTEGNO

In tabella 7-1 si riporta una sintesi della geometria dell'opera di sostegno e delle relative proprietà meccaniche.

Elemento	Tipo sezione	Quote	Proprietà	
<b>Cordolo testa pali</b>	Solid	alto 2.5 m	Area equivalente	1.8 m
			Inerzia equivalente	0.486 m <sup>4</sup> /m
		fondo 1.5 m	Classe CLS	C32/40
			Spessore	1.80 m
<b>Pali</b>	Tangent	alto 1.5 m	Efficacia	1
			Area equivalente	0.6545 m
			Inerzia equivalente	0.0409 m <sup>4</sup> /m
		fondo -8.5 m	Classe CLS	C25/30
			Spaziatura	1.20 m
			Diametro	1.00 m
		Efficacia	1	

Tabella n. 7-1. Proprietà dell'opera di sostegno

### 7.4 AZIONI ESTERNE

Nelle figure 7.5 e 7.6 sono rappresentate, con il loro valore caratteristico, le azioni applicate al muro nelle condizioni di traffico dominante e vento dominante rispettivamente. Trattandosi di carichi variabili, nelle combinazioni SLU-STR e SLU-GEO, detti valori sono amplificati rispettivamente del 50% e del 30%.

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
 TRATTO BORGO PANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
 POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
 AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
 “PASSANTE DI BOLOGNA”**

**PROGETTO DEFINITIVO**

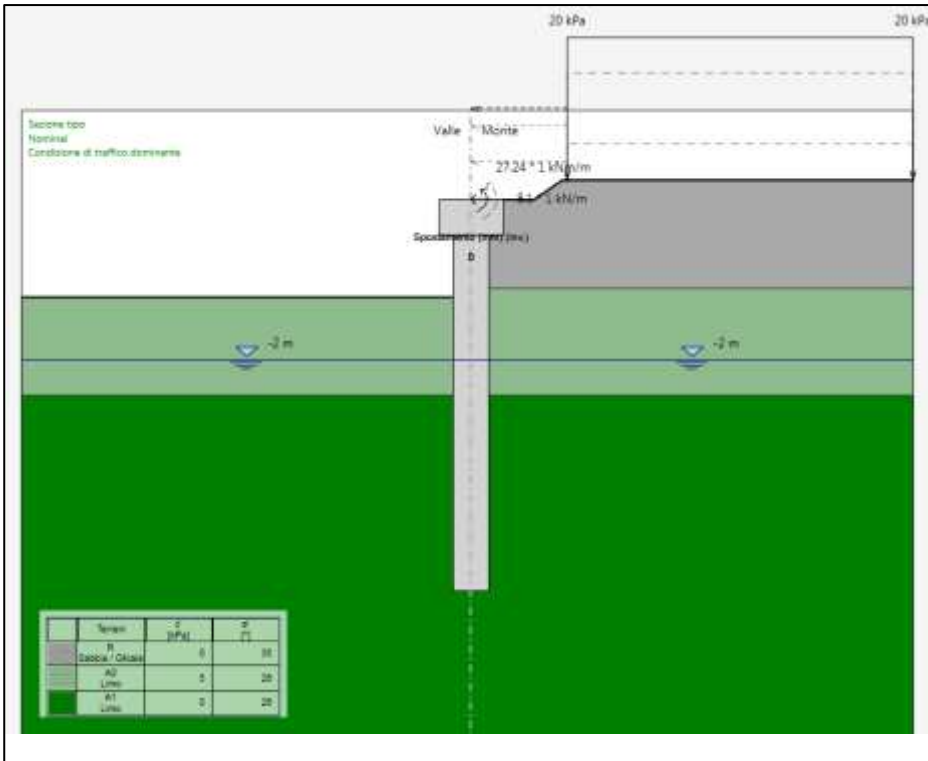


Figura 7-5 Carichi esterni agenti sul muro in condizioni di traffico dominante

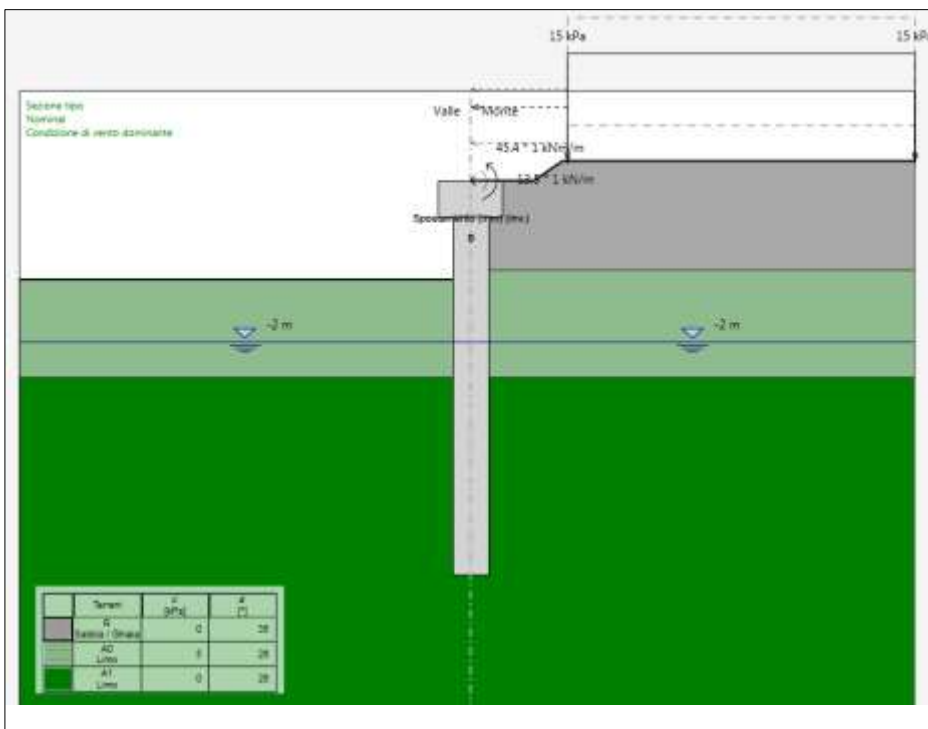


Figura 7-6 Carichi esterni agenti sul muro in condizioni di vento dominante

## 7.5 AZIONE SISMICA

Nelle figure 7-7 e 7-8 sono riportati rispettivamente i dati di input per la valutazione dell'azione sismica e il diagramma trapezio di pressione applicato alla paratia per simulare l'azione sismica nella combinazione SLV.

Figura 7-7. Dati di INPUT per la valutazione dell'azione sismica con approccio pseudo-statico

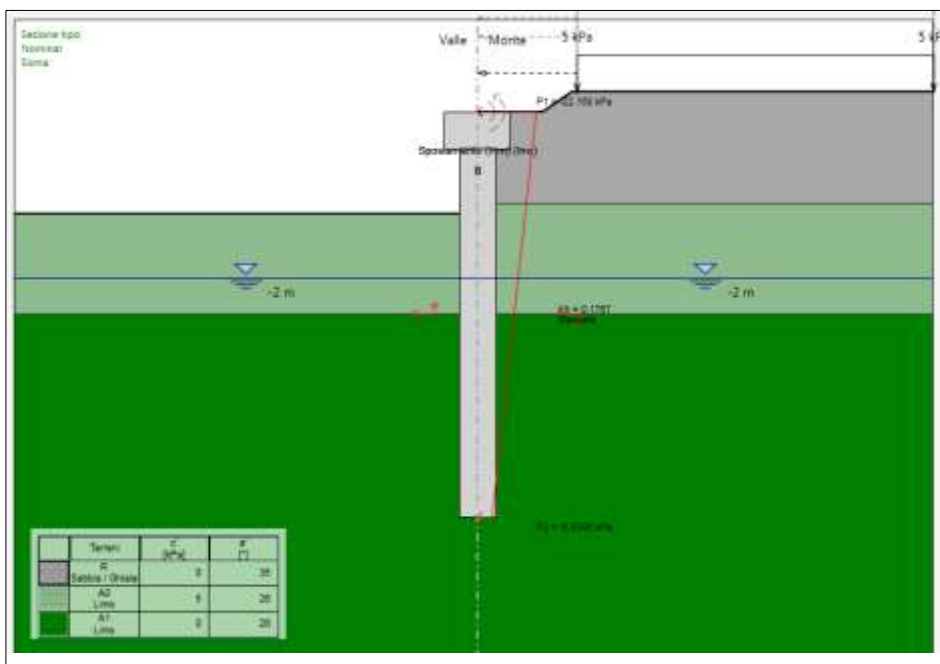


Figura 7-8. Diagramma di carico applicato al muro in condizioni sismiche

## 8 ANALISI DELL'OPERA - RISULTATI

### 8.1 SPOSTAMENTI

Nelle seguenti figure è riportato il grafico degli spostamenti dell'opera di sostegno con la profondità nella fase di ampliamento della strada a monte dell'autostrada, in assenza di carichi esterni (fase 3, figura 8-1) e nella combinazione SLE relativa alla condizione di servizio più gravosa (fase 5, vento dominante, figura 8-2).

Si osserva che:

- Lo spostamento massimo in esercizio, calcolato come differenza tra lo spostamento ottenuto in fase 5 e lo spostamento ottenuto in fase 3, risulta pari a  $\Delta s = 9,76 \text{ mm} - 3,91 \text{ mm} = 5,85 \text{ mm}$ , cioè allo 0.21% dell'altezza di calcolo del muro ( $H = 2,75 \text{ m} = 2,5 \text{ m} + 0.25 \text{ m}$ );
- Lo spostamento totale massimo, comprensivo della deformazione a fine costruzione,  $s_{\text{max}} = 9,76 \text{ mm}$  risulta pari allo 0.35% circa dell'altezza di calcolo del muro.

Le condizioni di accettabilità degli spostamenti del muro imposte (cfr. § 5.4) sono pertanto rispettate.

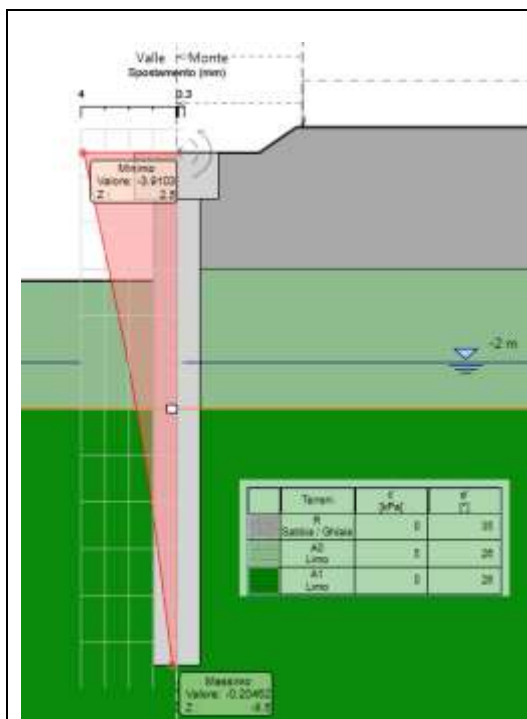


Figura 8-1. Spostamenti fase 3

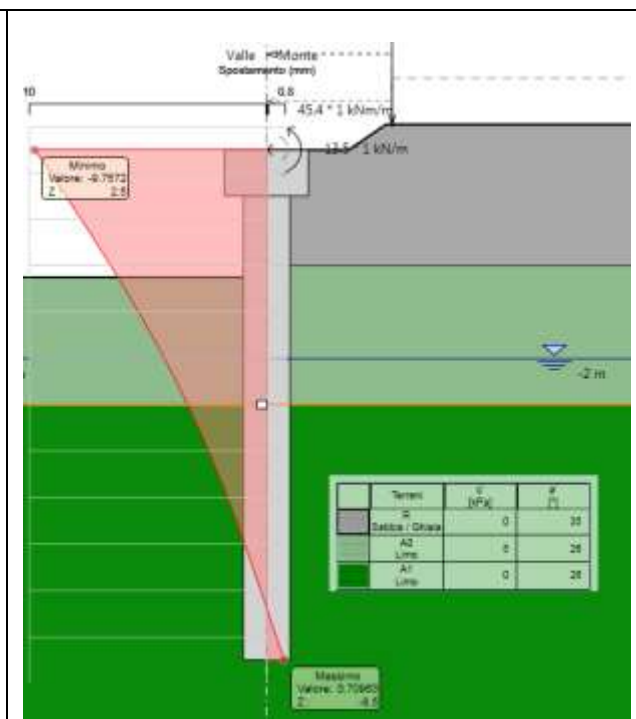
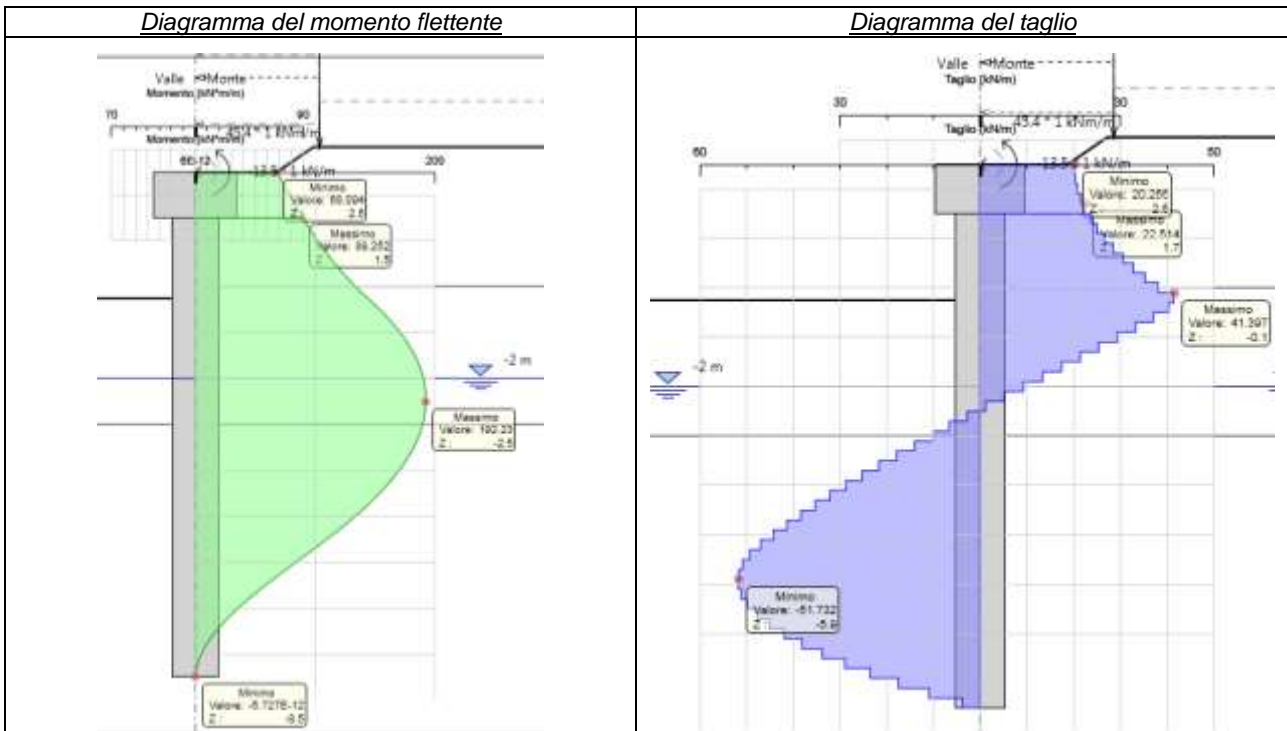


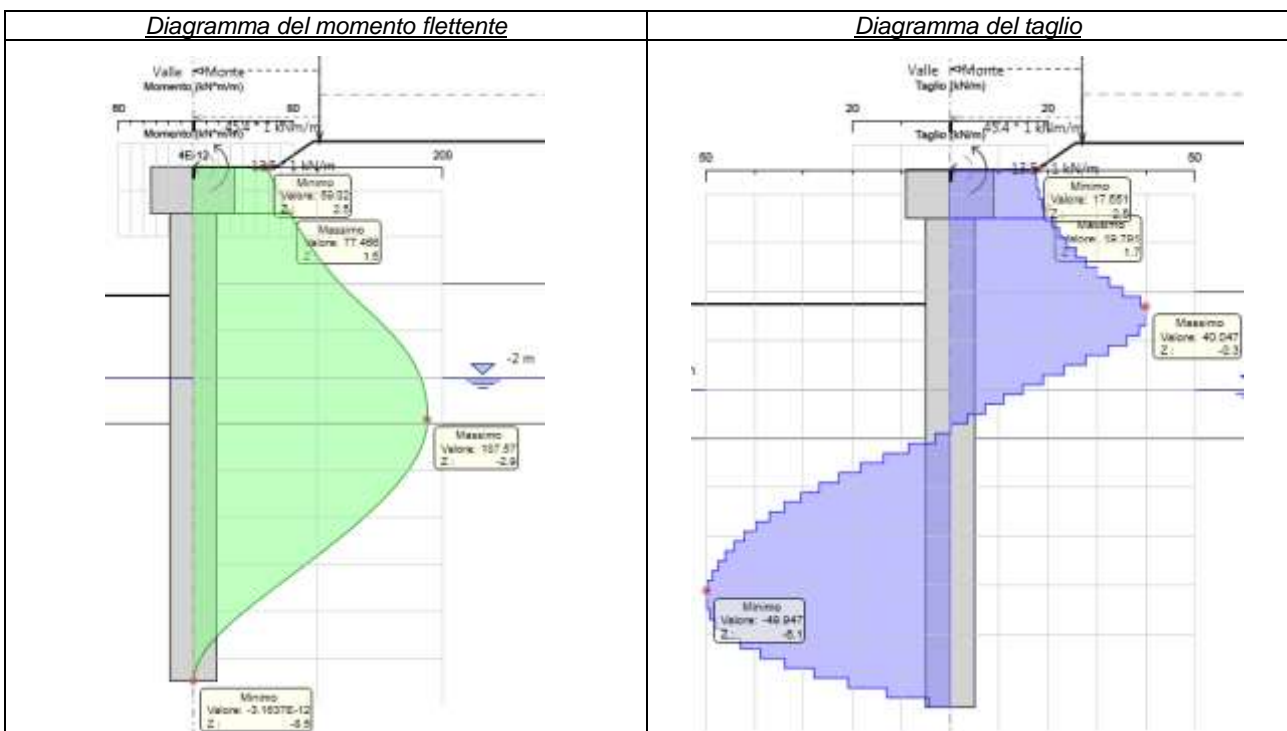
Figura 8-2. Spostamenti fase 5

## 8.2 SOLLECITAZIONI NELLA STRUTTURA

Nelle successive figure sono illustrati i grafici delle sollecitazioni di momento flettente e taglio calcolate nell'opera di sostegno in esame nelle combinazioni SLU-STR, SLU-GEO e SLV.



*Figura 8-3. Sollecitazioni nelle strutture nella combinazione SLU A1+M1+R1 nella condizione di vento dominante*



*Figura 8-4. Sollecitazioni nelle strutture nella combinazione SLU A2+M2+R1 nella condizione di vento dominante*



**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGO PANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**

**PROGETTO DEFINITIVO**

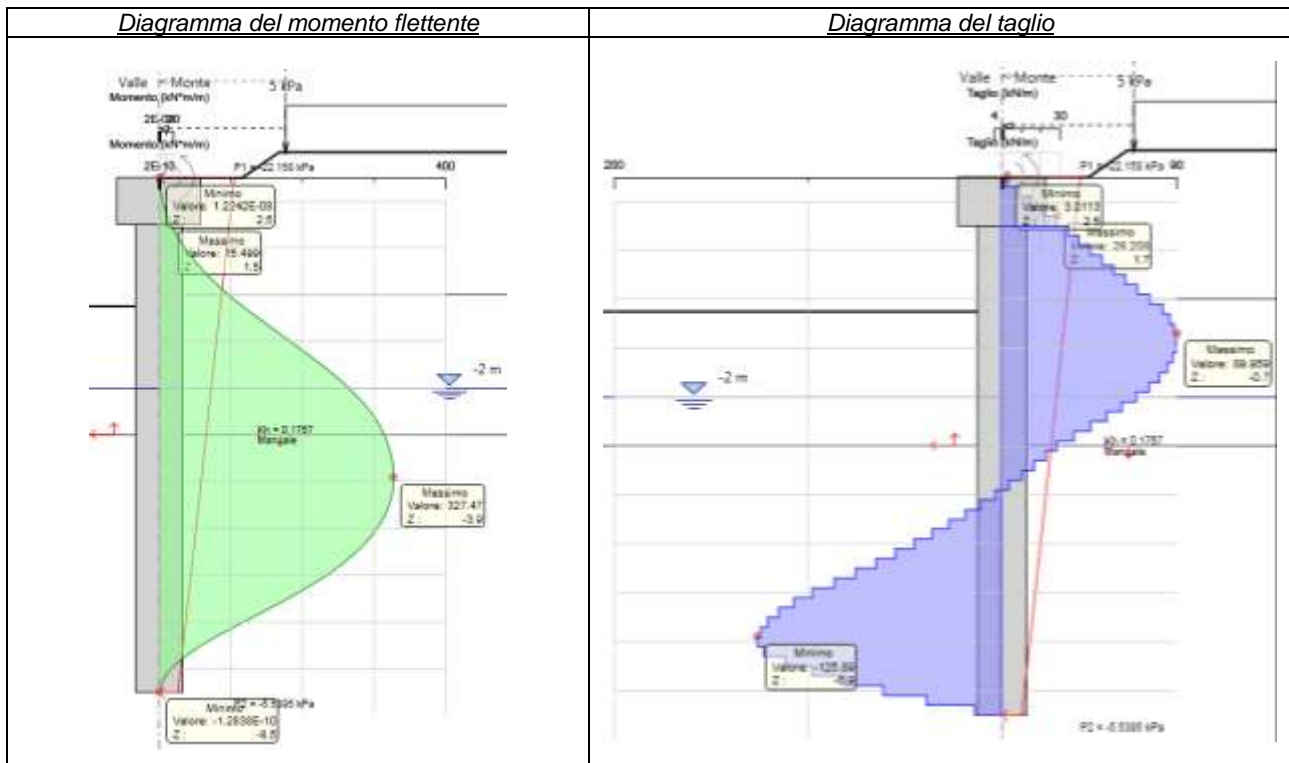


Figura 8-5. Sollecitazioni nelle strutture nella combinazione SLV (sisma)

Dalle azioni massime per metro lineare riportate in figura si ottengono le azioni di progetto per ciascun elemento strutturale sintetizzate in Tabella 8-1. Per completezza sono riportate anche le sollecitazioni massime in esercizio.

C.d.C.	Fase	Sezione	Azione	Cordolo testa pali	Pali
SLE	5	$M_{max}$	M (kNm)	59.6	158.7
			V (kN)	15.2	0.7
		$V_{max}$	M (kNm)	59.6	72.9
			V (kN)	15.2	42.8
SLU-STR	5	$M_{max}$	M (kNm)	<b>89.3</b>	230.7
			V (kN)	<b>22.5</b>	1.4
		$V_{max}$	M (kNm)	89.3	94.1
			V (kN)	22.5	62.1
SLU-GEO	5	$M_{max}$	M (kNm)	77.5	225.1
			V (kN)	19.8	0.1
		$V_{max}$	M (kNm)	77.5	90.0
			V (kN)	19.8	59.9
SLV	6	$M_{max}$	M (kNm)	<b>15.5</b>	<b>393.0</b>
			V (kN)	<b>28.2</b>	<b>4.7</b>
		$V_{max}$	M (kNm)	15.5	<b>126.1</b>
			V (kN)	28.2	<b>151.1</b>

Tabella n. 8-1. Azioni di progetto per le verifiche strutturali

## 9 ANALISI DELL'OPERA - VERIFICHE

### 9.1 VERIFICA DELL'IMMORSAMENTO DEI PALI

In figura 9-1 e in Figura 9-2 sono rappresentati i diagrammi di spinta a monte e a valle del muro nelle due combinazioni di carico più sfavorevoli ai fini delle verifiche geotecniche: SLU-GEO (Vento dominante) e SLV. In entrambi i casi la spinta passiva mobilitata a valle dell'opera è inferiore al 90% della resistenza disponibile:

- Combinazione SLU-GEO - fase 5: Thrust ratio =  $457.76/965.34 = 0.474$ .
- Combinazione SLV – fase 6: Thrust ratio =  $598.37/781.29 = 0.766$ .

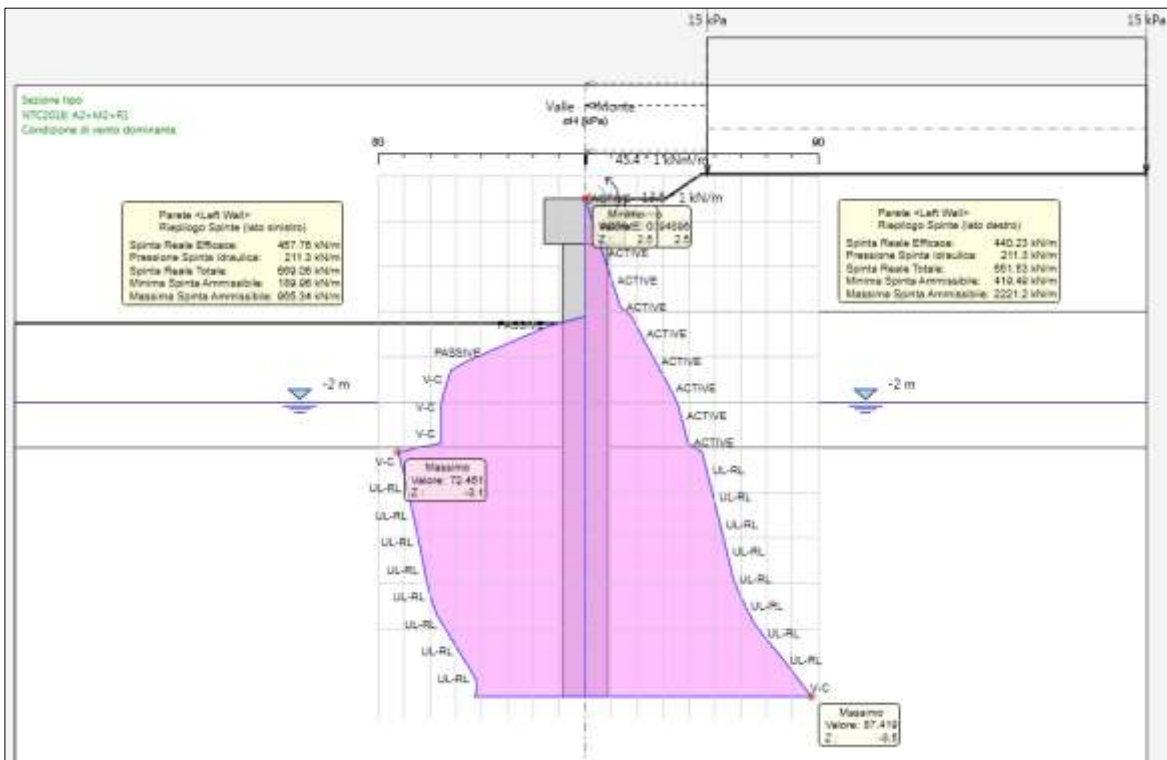


Figura 9-1. Riepilogo spinte fase 5 (vento dominante) – combinazione A2+M2+R1

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGOPANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**

**PROGETTO DEFINITIVO**

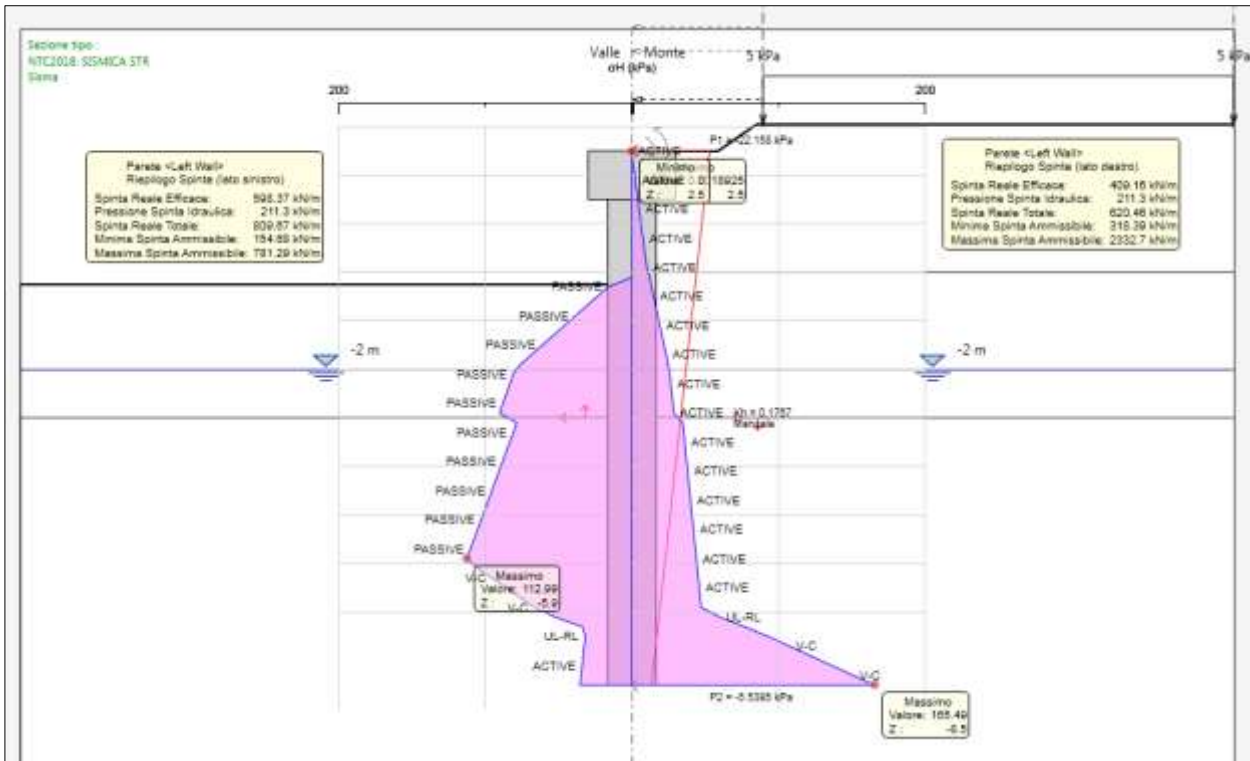


Figura 9-2. Riepilogo spinte fase 6 (sisma) – combinazione SLV

## 9.2 VERIFICA STRUTTURALE DEI PALI

La verifica strutturale dei pali viene svolta trascurando (a favore di sicurezza) la componente assiale del carico.

Si dispongono:

14 $\phi$ 26 con staffe a due braccia  $\phi$ 12 passo 15 cm.

Segue tabulato di calcolo.

### DATI GENERALI SEZIONE IN C.A.

NOME SEZIONE: Palo 1000\_controripa

Descrizione Sezione: Palo diametro 1000 mm  
 Metodo di calcolo resistenza: Stati Limite Ultimi  
 Normativa di riferimento: N.T.C.  
 Tipologia sezione: Sezione predefinita  
 Forma della sezione: Circolare  
 Percorso sollecitazione: A Sforzo Norm. costante  
 Condizioni Ambientali: Poco aggressive  
 Riferimento Sforzi assegnati: Assi x,y principali d'inertia  
 Riferimento alla sismicità: Zona non sismica  
 Posizione sezione nell'asta: Non in zona critica

### CARATTERISTICHE DI RESISTENZA DEI MATERIALI IMPIEGATI

CONGLOMERATO - Classe: C25/30  
 Resis. compr. di calcolo fcd : 141,60 daN/cm<sup>2</sup>  
 Resis. compr. ridotta fcd' : 70,80 daN/cm<sup>2</sup>  
 Def.unit. max resistenza ec2 : 0,0020  
 Def.unit. ultima ecu : 0,0035

**PROGETTO DEFINITIVO**

Diagramma tensione-deformaz. : Parabola-Rettangolo  
 Modulo Elastico Normale  $E_c$  : 314750 daN/cm<sup>2</sup>  
 Coeff. di Poisson : 0,20  
 Resis. media a trazione  $f_{ctm}$ : 26,00 daN/cm<sup>2</sup>  
 Coeff. Omogen. S.L.E. : 15,0  
 Combinazioni Rare in Esercizio  
     Sc Limite : 150,00 daN/cm<sup>2</sup>  
     Apert.Fess.Limite : Non prevista

ACCIAIO - Tipo: B450C  
 Resist. caratt. snervam.  $f_{yk}$ : 4500,0 daN/cm<sup>2</sup>  
 Resist. caratt. rottura  $f_{tk}$ : 4500,0 daN/cm<sup>2</sup>  
 Resist. snerv. di calcolo  $f_{yd}$ : 3913,0 daN/cm<sup>2</sup>  
 Resist. ultima di calcolo  $f_{td}$ : 3913,0 daN/cm<sup>2</sup>  
 Deform. ultima di calcolo  $E_{pu}$ : 0,068  
 Modulo Elastico  $E_f$  : 2000000 daN/cm<sup>2</sup>  
 Diagramma tensione-deformaz. : Bilineare finito  
 Coeff. Aderenza ist.  $\beta_1 \cdot \beta_2$  : 1,00 daN/cm<sup>2</sup>  
 Coeff. Aderenza diff.  $\beta_1 \cdot \beta_2$  : 0,50 daN/cm<sup>2</sup>  
 Comb.Rare Sf Limite : 3600,0 daN/cm<sup>2</sup>

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE ED ARMATURE SEZIONE**

Diametro sezione (cm): 100,0 cm  
 Barre circonfer.: 14Ø26 (74,3 cm<sup>2</sup>)  
 Copriferro (dal baric. barre): 8,5 cm

**ST.LIM.ULTIMI - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA**

N.Comb.	N	Mx	Vy	MT
1	0	39300	470	0
2	0	12610	15110	0

N Sforzo normale [daN] applicato nel baricentro (posit. se di compress.)  
 Mx Coppia concentrata in daNm applicata all'asse x baric. della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo sup. della sezione  
 Vy Taglio [daN] in direzione parallela all'asse y baric. della sezione

**COMB. RARE (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA**

N.Comb.	N	Mx
1	0	15870

N Sforzo normale [daN] applicato nel baricentro (positivo se di compress.)  
 Mx Coppia concentrata in daNm applicata all'asse x baricentrico della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo superiore della sezione  
 My Coppia concentrata in daNm applicata all'asse y baricentrico della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo destro della sezione

**RISULTATI DEL CALCOLO**

Copriferro netto minimo barre longitudinali: 7,2 cm  
 Interferro netto minimo barre longitudinali: 15,9 cm  
 Copriferro netto minimo staffe: 6,0 cm

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - RISULTATI PRESSO-TENSO FLESSIONE**

Ver S = combinazione verificata / N = combin. non verificata  
 N Sforzo normale assegnato [in daN] (positivo se di compressione)  
 Mx Momento flettente assegnato [in daNm] riferito all'asse x baricentrico  
 N ult Sforzo normale ultimo [in daN] nella sezione (positivo se di compress.)

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGO PANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**



**PROGETTO DEFINITIVO**

Mx ult Momento flettente ultimo [in daNm] riferito all'asse x baricentrico  
 Mis.Sic. Misura sicurezza = rapporto vettoriale tra (N ult, Mx ult) e (N, Mx)  
 Verifica positiva se tale rapporto risulta  $\geq 1.000$   
 Yneutro Ordinata [in cm] dell'asse neutro a rottura nel sistema di rif. X,Y,O sez.  
 x/d Rapp. di duttilità a rottura misurato in presenza di sola flessione (travi)  
 C.Rid. Coeff. di riduz. momenti per sola flessione in travi continue  
 Area efficace barre inf. (per presenza di torsione) = 74,3 cm<sup>2</sup>

N.Comb.	Ver	N	Mx	N ult	Mx ult	Mis.Sic.	Yneutro	x/d
---------	-----	---	----	-------	--------	----------	---------	-----

0,75	1	S	0	39300	-19	108299	2,756	27,6	0,25
0,75	2	S	0	12610	-19	108299	8,588	27,6	0,25

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - DEFORMAZIONI UNITARIE ALLO STATO ULTIMO**

ec max Deform. unit. massima del conglomerato a compressione  
 ec 3/7 Deform. unit. del conglomerato nella fibra a 3/7 dell'altezza efficace  
 Yc max Ordinata in cm della fibra corrisp. a ec max (sistema rif. X,Y,O sez.)  
 ef min Deform. unit. minima nell'acciaio (negativa se di trazione)  
 Yf min Ordinata in cm della barra corrisp. a ef min (sistema rif. X,Y,O sez.)  
 ef max Deform. unit. massima nell'acciaio (positiva se di compressione)  
 Yf max Ordinata in cm della barra corrisp. a ef max (sistema rif. X,Y,O sez.)

N.Comb.	ec max	ec 3/7	Yc max	ef min	Yf min	ef max	Yf max
1	0,00350	-0,00318	50,0	0,00217	41,5	-0,01077	-41,5
2	0,00350	-0,00318	50,0	0,00217	41,5	-0,01077	-41,5

**ARMATURE A TAGLIO E/O TORSIONE DI INVILUPPO PER TUTTE LE COMBINAZIONI ASSEGNATE**

Diametro staffe: 12 mm  
 Passo staffe: 15,0 cm [Passo massimo di normativa = 18,4 cm]  
 N.Bracci staffe: 2  
 Area staffe/m : 15,1 cm<sup>2</sup>/m [Area Staffe Minima normativa = 12,3 cm<sup>2</sup>/m]

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - VERIFICHE A TAGLIO**

Ver S = comb.verificata a taglio-tors./ N = comb. non verificata  
 Vsdu Taglio agente [daN] uguale al taglio Vy di comb. (sollecit. retta)  
 Vrd Taglio resistente [daN] in assenza di staffe  
 Vcd Taglio compressione resistente [daN] lato conglomerato  
 Vwd Taglio trazione resistente [daN] assorbito dalle staffe  
 bw Larghezza minima [cm] sezione misurata parallelam. all'asse neutro  
 Teta Angolo [gradi sessadec.] di inclinazione dei puntoni di conglomerato  
 Acw Coefficiente maggiorativo della resistenza a taglio per compressione  
 Afst Area staffe/metro strettamente necessaria per taglio e torsione [cm<sup>2</sup>/m]

N.Comb.	Ver	Vsdu	Vrd	Vcd	Vwd	bw	Teta	Acw	Afst
1	S	470	21118	144297	106113	82,2	21,80	1,000	0,1
2	S	15110	21118	144297	106113	82,2	21,80	1,000	2,1

**COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI**

Ver S = combinazione verificata / N = combin. non verificata  
 Sc max Massima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata ([daN/cm<sup>2</sup>)  
 Yc max Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc max (sistema rif. X,Y,O)

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGO PANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**



**PROGETTO DEFINITIVO**

Sc min	Minima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata [(daN/cm <sup>2</sup> )]
Yc min	Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc min (sistema rif. X,Y,O)
Sf min	Minima tensione di trazione (-) nell'acciaio [daN/cm <sup>2</sup> ]
Yf min	Ordinata in cm della barra corrisp. a Sf min (sistema rif. X,Y,O)
Dw Eff.	Spessore di conglomerato [cm] in zona tesa considerata aderente alle barre
Ac eff.	Area di congl. [cm <sup>2</sup> ] in zona tesa aderente alle barre (verifica fess.)
Af eff.	Area Barre tese di acciaio [cm <sup>2</sup> ] ricadente nell'area efficace(verifica fess.)
D barre	Distanza media in cm tra le barre tese efficaci (verifica fess.)

N.Comb. Ver Sc max Yc max Sc min Yc min Sf min Yf min Dw Eff. Ac eff. Af eff.  
Dbarre

1	S	13,5	-50,0	-13,5	-50,0	-168	41,5	0,0	0	0,0
---	---	------	-------	-------	-------	------	------	-----	---	-----

**COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA APERTURA FESSURE**

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata
ScImax	Massima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [daN/cm <sup>2</sup> ]
ScI_min	Minima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [daN/cm <sup>2</sup> ]
Sc Eff	Tensione al limite dello spessore efficace nello STATO I [daN/cm <sup>2</sup> ]
K3	Coeff. di normativa = 0,25 (Scmin + ScEff)/(2 Scmin)
Beta12	Prodotto dei Coeff. di aderenza Beta1*Beta2
Eps	Deformazione unitaria media tra le fessure
Srm	Distanza media in mm tra le fessure
Ap.fess.	Apertura delle fessure in mm = 1,7*Eps*Srm

N.Comb. Ver ScImax ScImin Sc Eff K3 Beta12 Eps Srm  
Ap.Fess.

1	S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0
1	S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0

**9.3 VERIFICA STRUTTURALE DEL CORDOLO TESTA PALI**

La verifica strutturale del setto in elevazione viene svolta trascurando (a favore di sicurezza) la componente assiale del carico.

Si dispongono 10φ20 + 10φ20 e staffe chiuse φ12 passo 15 cm.

Segue tabulato di calcolo.

**DATI GENERALI SEZIONE IN C.A.**

**NOME SEZIONE: Cordolo 180**

Descrizione Sezione:	
Metodo di calcolo resistenza:	Stati Limite Ultimi
Normativa di riferimento:	N.T.C.
Tipologia sezione:	Sezione predefinita
Forma della sezione:	Rettangolare
Percorso sollecitazione:	A Sforzo Norm. costante
Condizioni Ambientali:	Moderat. aggressive
Riferimento Sforzi assegnati:	Assi x,y principali d'inerzia
Riferimento alla sismicità:	Zona non sismica
Posizione sezione nell'asta:	In zona critica

**CARATTERISTICHE DI RESISTENZA DEI MATERIALI IMPIEGATI**

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGOPANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**



**PROGETTO DEFINITIVO**

CONGLOMERATO -	Classe: C28/35	
	Resis. compr. di calcolo fcd :	158,60 daN/cm <sup>2</sup>
	Resis. compr. ridotta fcd' :	79,30 daN/cm <sup>2</sup>
	Def.unit. max resistenza ec2 :	0,0020
	Def.unit. ultima ecu :	0,0035
	Diagramma tensione-deformaz. :	Parabola-Rettangolo
	Modulo Elastico Normale Ec :	323080 daN/cm <sup>2</sup>
	Coeff. di Poisson :	0,20
	Resis. media a trazione fctm:	28,80 daN/cm <sup>2</sup>
	Coeff. Omogen. S.L.E. :	15,0
	Combinazioni Rare in Esercizio	
	Sc Limite :	168,00 daN/cm <sup>2</sup>
	Apert.Fess.Limite :	Non prevista
ACCIAIO -	Tipo: B450C	
	Resist. caratt. snervam. fyk:	4500,0 daN/cm <sup>2</sup>
	Resist. caratt. rottura ftk:	4500,0 daN/cm <sup>2</sup>
	Resist. snerv. di calcolo fyd:	3913,0 daN/cm <sup>2</sup>
	Resist. ultima di calcolo ftd:	3913,0 daN/cm <sup>2</sup>
	Deform. ultima di calcolo Epu:	0,068
	Modulo Elastico Ef :	2000000 daN/cm <sup>2</sup>
	Diagramma tensione-deformaz. :	Bilineare finito
	Coeff. Aderenza ist. $\beta_1 \cdot \beta_2$ :	1,00 daN/cm <sup>2</sup>
	Coeff. Aderenza diff. $\beta_1 \cdot \beta_2$ :	0,50 daN/cm <sup>2</sup>
	Comb.Rare Sf Limite :	3600,0 daN/cm <sup>2</sup>

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE ED ARMATURE SEZIONE**

Base:	100,0 cm	
Altezza:	180,0 cm	
Barre inferiori	:	10Ø20 (31,4 cm <sup>2</sup> )
Barre superiori	:	10Ø20 (31,4 cm <sup>2</sup> )
Copriferro barre inf.(dal baric. barre)	:	6,2 cm
Copriferro barre sup.(dal baric. barre)	:	6,2 cm

**ST.LIM.ULTIMI - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA**

N	Sforzo normale [daN] applicato nel baricentro (posit. se di compress.)			
Mx	Coppia concentrata in daNm applicata all'asse x baric. della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo sup. della sezione			
Vy	Taglio [daN] in direzione parallela all'asse y baric. della sezione			
N.Comb.	N	Mx	Vy	MT
1	0	8930	2250	0
2	0	1550	2820	0

**COMB. RARE (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA**

N	Sforzo normale [daN] applicato nel baricentro (positivo se di compress.)	
Mx	Coppia concentrata in daNm applicata all'asse x baricentrico della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo superiore della sezione	
My	Coppia concentrata in daNm applicata all'asse y baricentrico della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo destro della sezione	
N.Comb.	N	Mx
1	0	5960

**RISULTATI DEL CALCOLO**

Copriferro netto minimo barre longitudinali: 5,2 cm  
 Interferro netto minimo barre longitudinali: 7,7 cm

**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGO PANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**



**PROGETTO DEFINITIVO**

Copriferro netto minimo staffe: 4,0 cm

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - RISULTATI PRESSO-TENSO FLESSIONE**

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata
N	Sforzo normale assegnato [in daN] (positivo se di compressione)
Mx	Momento flettente assegnato [in daNm] riferito all'asse x baricentrico
N ult	Sforzo normale ultimo [in daN] nella sezione (positivo se di compress.)
Mx ult	Momento flettente ultimo [in daNm] riferito all'asse x baricentrico
Mis.Sic.	Misura sicurezza = rapporto vettoriale tra (N ult,Mx ult) e (N,Mx) Verifica positiva se tale rapporto risulta >=1.000
Yneutro	Ordinata [in cm] dell'asse neutro a rottura nel sistema di rif. X,Y,O sez.
x/d	Rapp. di duttilità a rottura misurato in presenza di sola flessione (travi)
C.Rid.	Coeff. di riduz. momenti per sola flessione in travi continue Area efficace barre inf. (per presenza di torsione)= 31,4 cm <sup>2</sup> Area efficace barre sup. (per presenza di torsione)= 31,4 cm <sup>2</sup>

N.Comb.	Ver	N	Mx	N ult	Mx ult	Mis.Sic.	Yneutro	x/d	
0,70	1	S	0	8930	0	208957	23,399	172,6	0,04
0,70	2	S	0	1550	0	208957	134,811	172,6	0,04

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - DEFORMAZIONI UNITARIE ALLO STATO ULTIMO**

ec max	Deform. unit. massima del conglomerato a compressione
ec 3/7	Deform. unit. del conglomerato nella fibra a 3/7 dell'altezza efficace
Yc max	Ordinata in cm della fibra corrisp. a ec max (sistema rif. X,Y,O sez.)
ef min	Deform. unit. minima nell'acciaio (negativa se di trazione)
Yf min	Ordinata in cm della barra corrisp. a ef min (sistema rif. X,Y,O sez.)
ef max	Deform. unit. massima nell'acciaio (positiva se di compressione)
Yf max	Ordinata in cm della barra corrisp. a ef max (sistema rif. X,Y,O sez.)

N.Comb.	ec max	ec 3/7	Yc max	ef min	Yf min	ef max	Yf max
1	0,00301	-0,02829	180,0	0,00050	173,8	-0,06750	6,2
2	0,00301	-0,02829	180,0	0,00050	173,8	-0,06750	6,2

**ARMATURE A TAGLIO E/O TORSIONE DI INVILUPPO PER TUTTE LE COMBINAZIONI ASSEGNATE**

Diametro staffe:	12 mm	
Passo staffe:	15,0 cm	[Passo massimo di normativa = 15,1 cm]
N.Bracci staffe:	2	
Area staffe/m :	15,1 cm <sup>2</sup> /m	[Area Staffe Minima normativa = 15,0 cm <sup>2</sup> /m]

**METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - VERIFICHE A TAGLIO**

Ver	S = comb.verificata a taglio-tors./ N = comb. non verificata
Vsdu	Taglio agente [daN] uguale al taglio Vy di comb. (sollecit. retta)
Vrd	Taglio resistente [daN] in assenza di staffe
Vcd	Taglio compressione resistente [daN] lato conglomerato
Vwd	Taglio trazione resistente [daN] assorbito dalle staffe
bw	Larghezza minima [cm] sezione misurata parallelam. all'asse neutro
Teta	Angolo [gradi sessadec.] di inclinazione dei puntoni di conglomerato
Acw	Coefficiente maggiorativo della resistenza a taglio per compressione
Afst	Area staffe/metro strettamente necessaria per taglio e torsione [cm <sup>2</sup> /m]

N.Comb.	Ver	Vsdu	Vrd	Vcd	Vwd	bw	Teta	Acw	Afst
---------	-----	------	-----	-----	-----	----	------	-----	------



**AUTOSTRADA A14 BOLOGNA - BARI - TARANTO  
TRATTO BORGOPANIGALE – BOLOGNA SAN LAZZARO  
POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA  
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA  
“PASSANTE DI BOLOGNA”**



**PROGETTO DEFINITIVO**

1	S	2250	49886	427729	230746	100,0	21,80	1,000	0,1
2	S	2820	49886	427729	230746	100,0	21,80	1,000	0,2

**COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI**

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata									
Sc max	Massima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata ([daN/cm <sup>2</sup> ])									
Yc max	Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc max (sistema rif. X,Y,O)									
Sc min	Minima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata ([daN/cm <sup>2</sup> ])									
Yc min	Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc min (sistema rif. X,Y,O)									
Sf min	Minima tensione di trazione (-) nell'acciaio [daN/cm <sup>2</sup> ]									
Yf min	Ordinata in cm della barra corrisp. a Sf min (sistema rif. X,Y,O)									
Dw Eff.	Spessore di conglomerato [cm] in zona tesa considerata aderente alle barre									
Ac eff.	Area di congl. [cm <sup>2</sup> ] in zona tesa aderente alle barre (verifica fess.)									
Af eff.	Area Barre tese di acciaio [cm <sup>2</sup> ] ricadente nell'area efficace(verifica fess.)									
D barre	Distanza media in cm tra le barre tese efficaci (verifica fess.)									

N.Comb. Ver Sc max Yc max Sc min Yc min Sf min Yf min Dw Eff. Ac eff. Af eff.  
Dbarre

1	S	1,0	180,0	-1,0	180,0	-14	173,8	0,0	0	0,0
---	---	-----	-------	------	-------	-----	-------	-----	---	-----

**COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA APERTURA FESSURE**

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata								
ScImax	Massima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [daN/cm <sup>2</sup> ]								
ScI_min	Minima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [daN/cm <sup>2</sup> ]								
Sc Eff	Tensione al limite dello spessore efficace nello STATO I [daN/cm <sup>2</sup> ]								
K3	Coeff. di normativa = 0,25 (Scmin + ScEff)/(2 Scmin)								
Beta12	Prodotto dei Coeff. di aderenza Beta1*Beta2								
Eps	Deformazione unitaria media tra le fessure								
Srm	Distanza media in mm tra le fessure								
Ap.fess.	Apertura delle fessure in mm = 1,7*Eps*Srm								

N.Comb. Ver ScImax ScImin Sc Eff K3 Beta12 Eps Srm  
Ap.Fess.

1	S	0,0	0,0	0,0		0,0	0,000000	0
---	---	-----	-----	-----	--	-----	----------	---